

功率器件散热器的热阻分析与设计

史贤俊 周绍磊 海军航空工程学院 (烟台 264001)

摘要: 本文简要分析了功率 MOSFET 在开关过程中的各种损耗, 总结了结温的简化算法, 结温和环境温度决定了散热器的热阻的设计。

叙词: 功率 MOSFET 功耗 结温 热阻

1 概述

功率 MOSFET 广泛地应用于中小功率的开关变换装置中, 正确的分析功耗和计算结温是功率器件可靠运行的一个重要因素, 因为功率 MOSFET 是一种受热限制的功率器件, 必须保证在最大耗散功率和最高环境温度下, 其结温能够低于器件的额定值 (一般为 150°C)。

因此, 首先要确定器件的总功耗, 这并非单调的关系。因为功耗决定了温升, 但是, 功耗本身又是结温的函数, 因为通态电阻随温度升高而增加, 由于通态电阻的增加具有非线性, 而且随器件类型各不相同, 要得到准确解是比较麻烦的。

当功率 MOSFET 作开关应用时, 其总损耗可由下式表示:

$$P = P_S + P_C + P_L + P_C \quad (1)$$

其中: P 是总损耗, P_S 是开关损耗, P_C 是栅驱动损耗, P_L 是关断时漏电流引起的阻断损耗, P_C 是导通损耗。

2 开关损耗 P_S

因为功率 MOSFET 的开关速度很快, 只要是把驱动电路设计好, 其开关时间很短。因此, 从理论上来说, 它的开关损耗非常小。对于电感性负载, 开关波形可以近似为图 1 (A)。

$$\text{其中: } I_D(t) = \begin{cases} I_D & (t \leq t_s/2) \\ -\frac{2I_D}{t_s} \cdot t + 2I_D & (t_s/2 \leq t \leq t_s) \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{DS}(t) = \begin{cases} \frac{2V_{DS}}{t_s} \cdot t & (t \leq t_s/2) \\ V_{DS} & (t_s/2 \leq t \leq t_s) \end{cases} \quad (3)$$

则理论开关损耗为:

$$P_{SL} = f_s \cdot \int_0^{t_s} V_{DS}(t) \cdot I_D(t) \cdot dt \quad (4)$$

将式 (2) 式 (3) 带入式 (4) 可得:

$$P_{SL} = \frac{V_{DS} \cdot I_D}{2} \cdot t_s \cdot f_s \quad (5)$$

通常, 功率 MOSFET 两端并有 RCD 吸收电路, 其吸收电容 C_{DS} 和功率 MOSFET 本身的漏极电容大的足以改变过渡过程。此时, 开关波形近似为图 1 (B), 即 I_{DS} 和 V_{DS} 的交点将下降。因此, 消耗在管子上的功率将下降, 可以近似认为下降的那一部分功率转移到了吸收电路上, 即实际开关损耗为:

$$P_S = P_{SL} - \frac{1}{2} \cdot C_{DS} \cdot V_{DS}^2 \cdot f_s \quad (6)$$

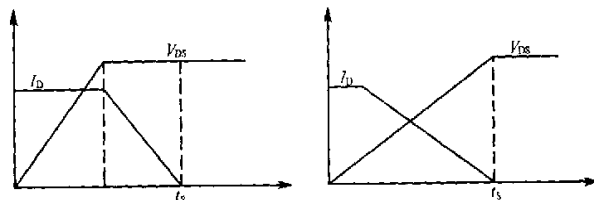


图 1 (A)

图 1 (B)

3 阻断时的损耗 P_L

$$P_L = I_{DSS} \cdot V_{DS} \cdot (1 - D) \quad (7)$$

通常 I_{DSS} 的数值很小, 因此, 对一个 500V 的器件来说, P_L 的数值不会超过 0.5W, 基本上可以忽略不计。

4 栅驱动损耗 P_G

$$P_G = V_{GS} \cdot Q_G \cdot f_s \quad (8)$$

其中 Q_G 为功率 MOSFET 的栅电荷, f_s 为开关频率。

一般的功率 MOSFET 的 Q_G 在几百 nC 左右, 因此, 当开关频率低于 100kHz 时, 栅驱动损耗也是很小的。

5 导通损耗 P_C

导通损耗是功率 MOSFET 的主要功耗, 其基本公式为:

$$P_C = I_{D(RMS)}^2 \cdot R_{DS(ON)} \quad (9)$$

其中 $I_{D(RMS)}$ 为漏极电流的有效值, $R_{DS(ON)}$ 为导通电阻。

式 (9) 看似简单。但是, 在许多开关应用中, I_D 的波形是有一定占空比的梯形波, 因此, 首先应根据有效值的定义进行转换。另外, $R_{DS(ON)}$ 是温度的函数, 而温度本身又是功耗的函数。导通电阻准确的值可以通过查表得出, 当环境温度大于 25°C 时, 也可以用下面的公式近似求出:

$$R_{DS(ON)} \approx R_{DS(ON)25} \cdot [1 + 0.007 (\Delta T_{JA} + T_A - 25)] \quad (10)$$

其中: $R_{DS(ON)25}$ 为在 25°C 下的导通电阻, T_A 为环境温度, ΔT_{JA} 为相对于环境的结温升, $[\]$ 内各项是考虑到结温每升高一度时 $R_{DS(ON)}$ 典型地增加 0.7%。

由以上分析可知, P_S , P_L , P_G 基本上和温度无关, 可以看作是常数。而 P_C 由于导通电阻随温度升高而增加, 所以导通损耗是随温度变化而变化的。因此, 总损耗可以分解成两部分, 一部分等效成一个常数 P_1 , 另一部分是可变损耗 P_C 。即:

$$P = P_S + P_L + P_G + P_C = P_1 + P_C = P_1 + I_{D(RMS)}^2 \cdot R_{DS(ON)25} \cdot [1 + 0.007 (\Delta T_{JA} + T_A - 25)] \quad (11)$$

因为 $\Delta T_{JA} = P \cdot R_{JA}$

$$(12)$$

其中 R_{JA} 为结到环境的热阻。

所以, 由式 (11) 和式 (12) 可以求出:

$$R_{JA} = \frac{\Delta T_{JA}}{I_{D(RMS)}^2 \cdot R_{DS(ON)25} \cdot [1 + 0.007 (\Delta T_{JA} + T_A - 25)] + P_1} \quad (13)$$

而

$$R_{JA} = R_{JC} + R_{CH} + R_{HA} \quad (14)$$

所以可求出散热器的热阻为:

$$R_{HA} = R_{JA} - R_{JC} - R_{CH} \quad (15)$$

其中: R_{JC} 为结到壳的热阻, R_{CH} 为壳到散热器的热阻, R_{HA} 为散热器到环境的热阻。

6 设计举例

器件	IRFP460
R_{JC}	0.5°C/W
R_{CH}	0.17°C/W
$R_{DS(ON)25}$	0.25Ω
T_A	55°C
ΔT_{JA}	30°C
$I_{D(RMS)}$	7A
P_1	8W

已经假设 P_1 是一个不为零的常数, 因此把有关的数值代入式 (13) 可以求出结到空气的热阻如下:

$$R_{JA} = \frac{\Delta T_{JA}}{I_{D(RMS)}^2 \cdot R_{DS(ON)25} \cdot [1 + 0.007 (\Delta T_{JA} + T_A - 25)] + P_1}$$

$$= \frac{30}{7^2 \times 0.25 \times [1 + 0.007 (30 + 55 - 25)]} + 8$$

$$\approx 1.18$$

$$R_{HA} = R_{JA} - R_{JC} - R_{CH} = 1.18 - 0.5 - 0.17 \approx 0.51 \text{ (}^\circ\text{C/W)}$$

R_{HA} 即为所求的散热器的热阻。

参考文献

功率场效应管应用大全 IR. AN-942. 9110

(上接 168 页)

即次级共绕 13 匝，在 3 匝、5 匝处各抽 1 头。

参考文献

- [1] 北京半导体器件五厂 最新开关集成稳压器数据应用手册
- [2] 胡存生 集成开关电源的设计制作调试与维修
- [3] 毛鸿 新一代电流型 PWM 控制器 UCC3802 及其应用

作者简介



刘喜萌，1948 年生，高级工程师。毕业于长春邮电学院自控专业。从事通信电路与电源的开发研制工作多年，曾发表论文 30 余篇。



刘志志，1962 年生，高级工程师。毕业于长春邮电学院自控专业。现担任三元公司副总经理，发表学术论文数篇。